

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.04.017

# 多梁式中央翼盒下壁板压缩稳定性研究

## Stability Study of Buckling on Stiffened Lower Panel for Center Wing Box with Multi-beam

龚德志 王新栋 叶聪杰 / GONG Dezhi WANG Xindong YE Congjie

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

研究多梁式翼盒加筋壁板在压缩载荷作用下的稳定性。针对端部支持、侧边支持、本身曲率以及上述因素的综合作用对加筋壁板压缩失稳临界应力的影响进行分析,对目前文献资料中关于加筋壁板压缩稳定性临界应力计算公式中端部支持系数进行适当修正,以得到适合的壁板屈曲应力。研究发现,端部夹持、侧边梁支持和蒙皮自身曲率对加筋壁板的压缩稳定性有较大影响,对于蒙皮较厚的加筋曲板(如机翼壁板),建议的等效端部支持系数为1.5~2.0。

**关键词:**多梁式翼盒;加筋板;屈曲;端部支持系数

**中图分类号:**V224

**文献标识码:**A

**[Abstract]** This paper studies the buckling of stiffened lower panel of center wing box with multi-beam under compressive loading. For the effect of end support, lateral support and curvature for the buckling of panel, the end support fact of critical compressive stress formula of stiffened panel in current design manual was analyzed, and proper buckling stress of stiffened panel was obtained. The result shows that the end support, lateral support and curvature of skin make a significant effect on the stabilization of stiffened panel under compressive loading, and for the stiffened panel with thick skin, the end support fact is advised to be 1.5~2.0.

**[Keywords]** multi-beam wing box; stiffened panel; buckling; end fixed fact

## 0 引言

民用飞机的中央翼结构设计常采用多肋式或多梁式的结构布置形式。譬如空客系列飞机的中央翼盒常采用多肋(桁架肋)式布置,而波音系列飞机的中央翼盒则习惯采用多梁式布置。在工作状态下,中央翼盒通过上、下壁板的展向拉、压承受机翼弯曲引起的翼根弯矩。承压结构失稳而引起结构失效是制约民用飞机中央翼盒强度的一个主要因素。无论多肋式还是多梁式中央翼盒,上壁板均有较为密集的地板梁支持,具有较高的展向压缩设计值;下壁板则一般按承受展向拉伸载荷设计,但对下壁板的稳定性设计也是不容忽视的。特别是多梁式中央翼盒,下壁板从端肋平面到龙骨梁之间处于无支持状态,在某些机翼下弯工况下,其稳定

性问题将变得十分突出。

国内外许多专家学者对组合式加筋壁板的压缩稳定性进行了大量的理论和实践研究,给出了较为完善的分析方法,形成了设计手册,进而指导飞机设计员进行设计工作。然而,目前的分析方法对多梁式翼盒加筋壁板的稳定性计算要么不适用,要么过于保守。在文献[1]第446~453页和文献[2]第88~99页中给出的图表要求加筋壁板的加筋比(筋条截面积与蒙皮截面积之比)为0~0.4,而文献[4]第556页则要求民用飞机壁板设计的加筋比不应小于0.5。同时,文献[1]第446页和文献[2]第137页中给出的方法均未考虑本身曲率对加筋壁板稳定性的影响。

本文对多梁式中央翼盒下壁板在压缩载荷作用下的稳定性进行研究,针对不同的边界条件以及

结构形式的加筋壁板开展有限元计算,并对工程计算公式的参数进行修正,在安全的前提下,减少其保守量,为飞机壁板设计提供参考。

1 多梁式中央翼盒结构简介

相对于多肋式中央翼盒,多梁式中央翼盒除了

前梁和后梁外,其内部至少还布置一根沿展向的翼梁(图 1(b)),且布置有一根翼肋或没有翼肋,如图 1 所示。此外,上壁板上表面沿航向一般布置有多根地板梁(图 1(c)),下壁板下表面则沿航向布置有龙骨梁(图 1(d)),由长桁和蒙皮组成的加筋壁板构成了翼盒的上、下壁板。

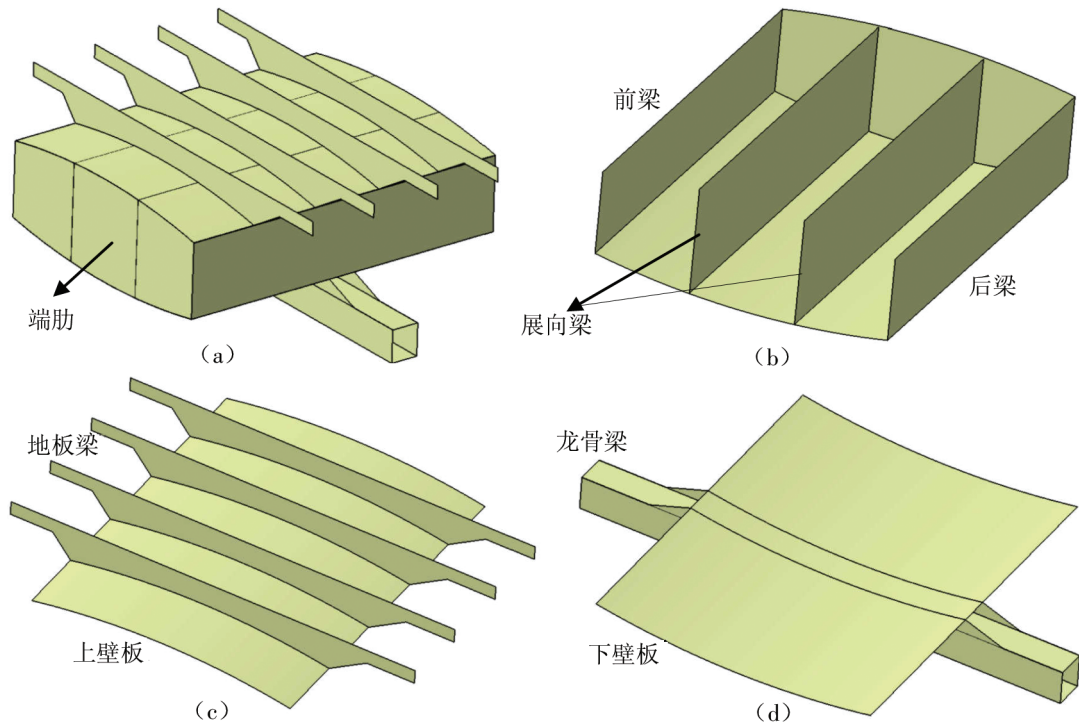


图 1 多梁式翼盒结构示意图

下壁板长桁端头通常斜削并加宽,进而插入翼盒端肋齿形缘条与对接带板之间,如图 2 所示,即下壁板端部被肋缘条和对接带板夹持,这

样的连接结构具有重量轻、可靠性高和固有破损—安全特性等优点,在民用飞机结构上被广泛应用。

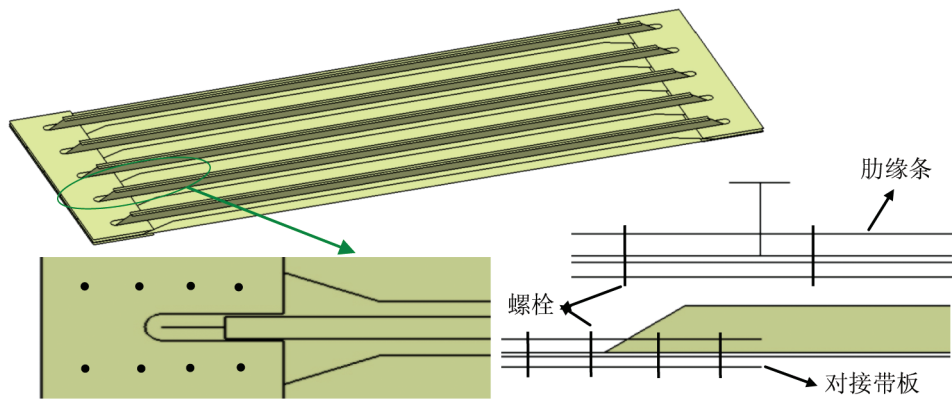


图 2 下壁板结构及端部连接示意图

## 2 加筋壁板压缩稳定性工程计算方法

加筋壁板承受轴向压缩载荷作用示意图如图 3 所示。根据文献[1]第 469 页,加筋壁板柱压缩强度曲线分为短柱区、中长柱区和长柱区。加筋壁板从肋平面到龙骨梁位置较长,单根长桁与蒙皮组成的壁板长细比较大,加筋壁板有效长度  $L'$  与壁板回转半径  $\rho$  的比值通常落在长柱区,壁板的失稳形式为 Euler 柱失稳(弯曲失稳且临界应力依然处于材料线弹性范围内<sup>[3]</sup>),其临界应力由式(1)计算。

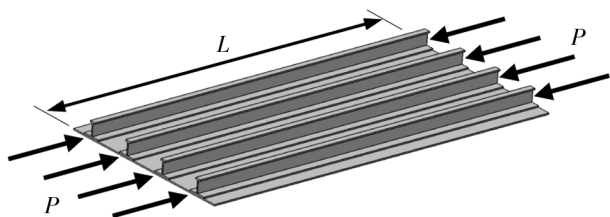


图3 壁板受压示意图

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_c}{(L'/\rho)^2} \quad (1)$$

式中,  $E_c$  为材料压缩弹性模量, MPa;  $L'$  为壁板的有效长度, mm;  $\rho$  为壁板的横截面回转半径, mm。

式(1)中壁板的有效长度和横截面回转半径分别由式(2)和式(3)计算。

$$L' = \frac{L}{\sqrt{C}} \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

式中,  $L$  为壁板在两端支持结构之间的长度, mm;  $C$  为壁板的端部支持系数;  $I$  为壁板截面惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  $A$  为壁板截面积,  $\text{mm}^2$ 。

采用文献[1]第 469 页中的公式来计算加筋壁板的压缩失稳临界应力尽管简单方便,但该文献中并未给出壁板的端部支持系数  $C$  的取值。文献[4]第 552 页中建议  $C=1.5$ ,然而通过计算及试验发现其结果较为保守,某试验中壁板由公式计算得到压缩失稳临界应力远低于有限元计算值,亦低于工作应力值,而壁板在试验载荷下并未发生失稳,如图 4 所示。另外,各方法均未给出加筋壁板端部支持系数  $C$  的计算方法,并且不能合理地考虑多梁式中央翼盒中展向梁对壁板的边界支持作用。

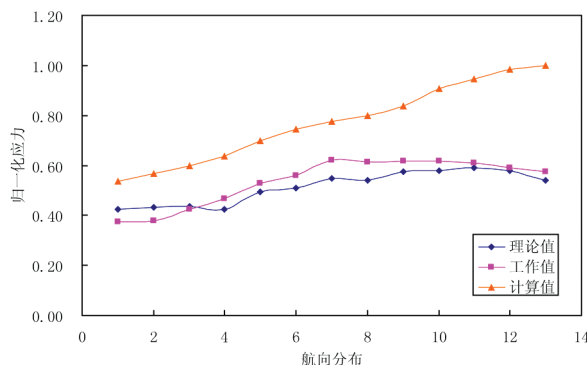


图4 试验中壁板压缩应力归一化图表

下文将通过有限元分析计算,分别研究端部约束、壁板曲率以及侧边支持三个因素对加筋壁板压缩失稳临界应力的影响。

## 3 加筋壁板模型参数

文献[4]第 556 页中的计算方法要求壁板加筋比(长桁截面积与蒙皮截面积之比)不大于 0.5。然而,为了得到较高结构效率,理想状态下承压加筋壁板的加筋比应为 1.2 左右,见文献[4]第 553 – 554 页。因此,本文折中考虑取壁板加筋比为 0.8 左右。

单根长桁与蒙皮组成的加筋壁板截面如图 5 所示。考虑到目前单通道机型中央翼壁板两根梁之间一般布置 5 ~ 7 根长桁,模型中长桁数目分别取 5、6 和 7,如图 5 所示;为了便于建模并减少计算量,取加筋壁板截面参数  $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t$ ,  $b_1 = 20$  mm、 $b_2 = 45$  mm、 $b_3 = 60$  mm、 $b_4 = 160$  mm,其中,  $t$  分别取 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm 和 7 mm;壁板总长  $L_0 = 3\,600$  mm,龙骨梁宽度  $b_0 = 500$  mm,端肋与龙骨梁侧边长度  $L = 1\,550$  mm;加筋曲板曲率半径  $R$  分别取 5 000 mm、7 000 mm、10 000 mm 和 15 000 mm。加筋壁板长度定义见图 6。本文计算的壁板结构几何参数见表 2。壁板材料取疲劳性能较好的 2000 系列铝合金,螺栓材料为 Ti-6Al-4V,材料属性见表 1。

表1 金属材料性能数据

材料	Z / MPa	G / MPa	泊松比
2024-T3	73 771	27 733.5	0.33
Ti-6Al-4V	116 500	44 465.6	0.31

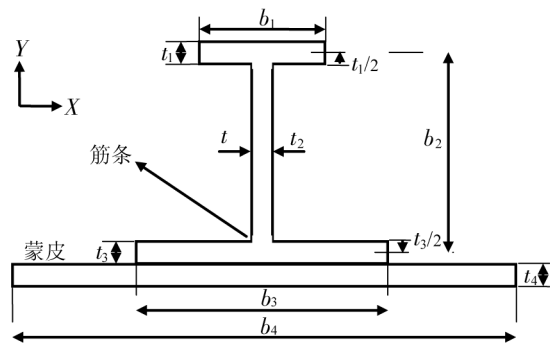


图 5 单根长桁和蒙皮组成的加筋壁板截面图

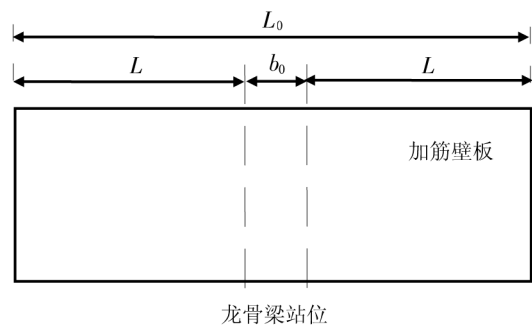


图 6 加筋壁板长度定义

表 2 加筋壁板几何特性

模型 编号	$t_1$ mm	$b_1$ mm	$t_2$ mm	$b_2$ mm	$t_3$ mm	$b_3$ mm	$t_4$ mm	$b_4$ mm	$A$ mm <sup>2</sup>	加筋比	$I$ mm <sup>4</sup>	$\rho$ mm
1	3	30	3	45	3	60	3	160	876	0.83	452 110	16.40
2	4	30	4	45	4	60	4	160	1164	0.82	623 571	16.68
3	5	30	5	45	5	60	5	160	1450	0.81	806 771	16.98
4	6	30	6	45	6	60	6	160	1734	0.81	1 002 496	17.29
5	7	30	7	45	7	60	7	160	2016	0.80	1 211 513	17.61

4 有限元模型

加筋壁板的有限元建模及计算通过 MSC. Patran/Nastran 平台进行,有限元模型采用四边形 CQUAD4 单元以及极少量的三角形 CTRIA 单元模拟,连接螺栓采用 CWELD 单元模拟。图 7 为加筋壁板有限元模型,图 8 为两侧有梁支持的加筋壁板有限元模型示意图,图 9 为加筋壁板有限元模型端部夹持方式,图 10 为带曲率加筋壁板有限元模型示意图。

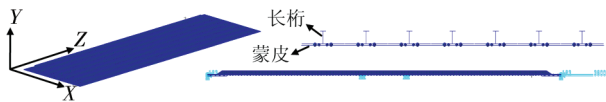


图 7 加筋平板有限元模型

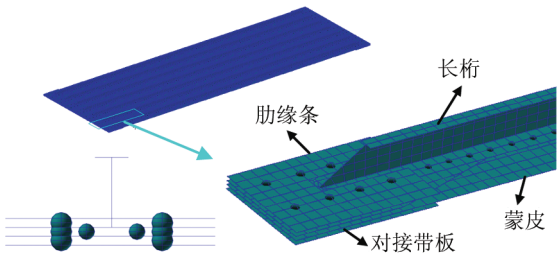


图 9 端部夹持加筋平板有限元模型

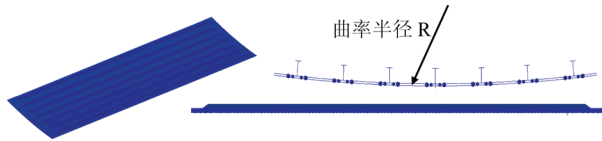


图 10 加筋曲板有限元模型

载荷和边界条件为:对壁板龙骨梁站位约束蒙皮面外位移( $Y$ 向位移);加筋壁板一端约束  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  向位移,另一端约束  $X$  和  $Y$  向位移并沿  $Z$  向施加 0.36 mm 的压缩位移载荷。

5 计算结果

失稳临界应力:  $\sigma_{cr} = \lambda \sigma_0$ ,  $\lambda$  为由有限元屈曲分

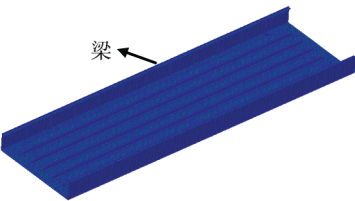


图 8 侧边梁支持加筋平板有限元模型

析得到的屈曲特征值。

加筋壁板等效端部支持系数  $C$  通过 Euler 式 (1) 反推式 (4) 得到。

$$C = \sigma_{cr} L^2 / (\pi^2 \rho^2 E_c) \quad (4)$$

### 5.1 加筋平板压缩屈曲

分别对由 5、6 和 7 根长桁组成的加筋平板在仅有龙骨梁支持状态下受轴向压缩载荷时失稳临界应力进行计算。加筋壁板屈曲符合弯曲 (Euler) 柱强度屈曲的特点 (垂直于板面弯曲), 如图 11 所示。失稳临界应力见表 2。根据式 (2) 计算得到壁板等

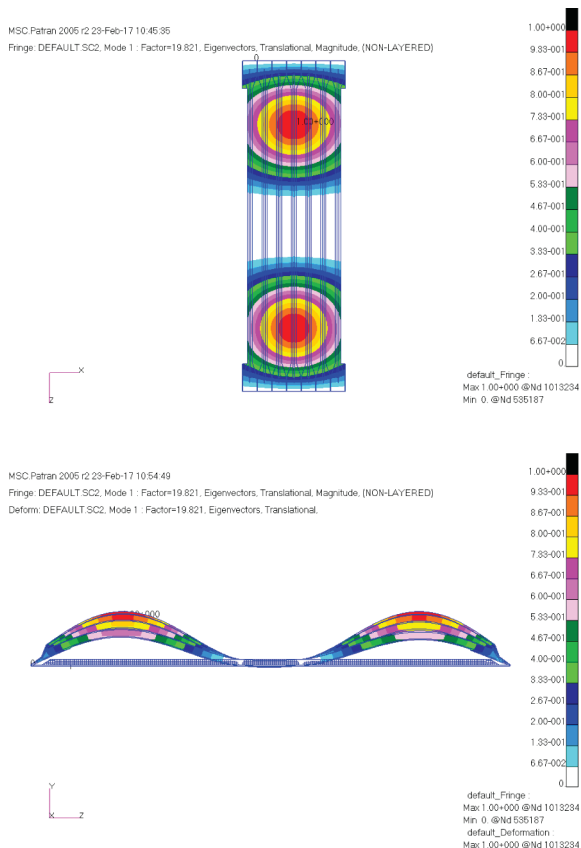


图 11 加筋平板屈曲模式

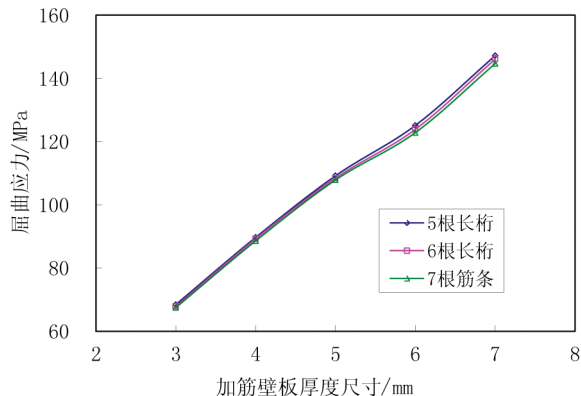


图 12 加筋平板压缩屈曲应力

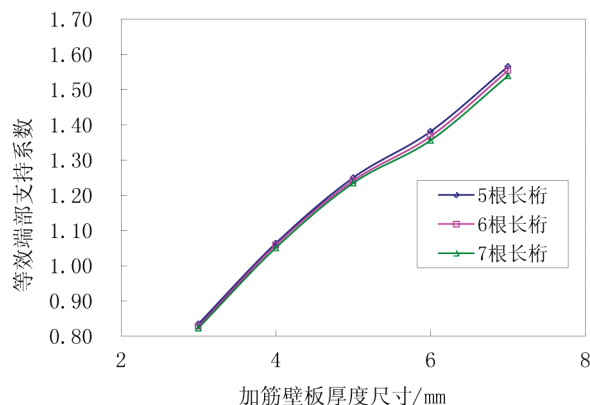


图 13 加筋壁板等效端部支持系数

效端部支持系数如图 12 和图 13 所示。通过图 12 和图 13 可看出加筋壁板其等效端部支持系数随长桁数增加而变小。

(1) 蒙皮厚度较小的加筋壁板等效端部支持系数小于 1, 由于壁板加载偏心造成。而蒙皮与长桁之间有一定的高度, 分别对长桁和蒙皮进行约束, 限制加筋壁板的转动自由度, 厚度较大加筋壁板等效端部支持系数大于 1;

(2) 加筋壁板等效端部支持系数在厚度等于 6 mm 处出现转折, 由于前面蒙皮先于长桁失稳, 而后则是长桁先于蒙皮失稳引起。

### 5.2 侧边展向梁支持加筋平板的压缩屈曲

本小节所考察的加筋壁板中, 将侧边长桁弹性支持改为梁弹性支持, 梁为壁板两侧提供的面外支持刚度高于长桁, 并有效增大壁板的扭转刚度, 从而影响加筋壁板的压缩屈曲强度。

选取梁厚度为壁板蒙皮厚度的 1.2 倍, 分析得到侧边梁支持加筋平板失稳临界应力如图 14 所示; 其等效端部支持系数如图 15 所示。

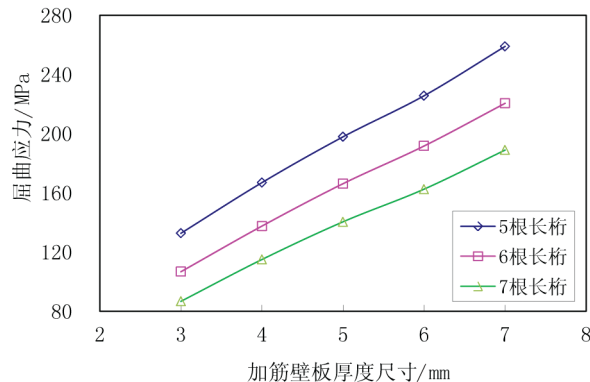


图 14 侧边展向梁支持加筋平板失稳临界应力



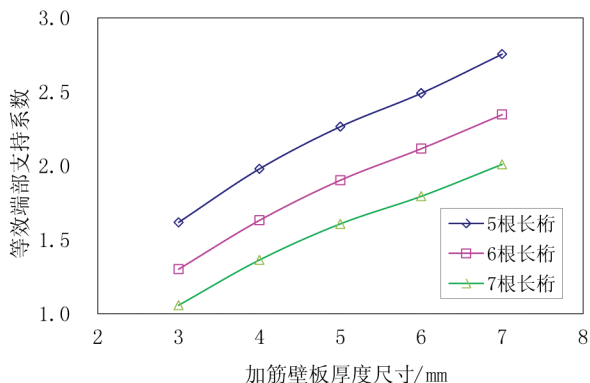


图 15 侧边展向梁支持加筋平板等效端部支持系数

从上图可看出,翼梁对加筋壁板端部支持系数的影响较为明显,较图 12 和图 13 提高 22% 左右;壁板长桁数量越少,翼梁支持对壁板等效端部支持系数影响越大。

### 5.3 端部夹持加筋平板压缩屈曲

端部夹持(如图 9 所示)能够增加对壁板面外弯曲的约束。本小节所述加筋壁板取长桁数为 7,夹持结构的厚度分别取为加筋壁板蒙皮厚度尺寸的 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 和 2.0 倍。

通过计算得到两端简支加筋平板的失稳临界应力,如图 16 所示;其等效端部支持系数如图 17 所示。

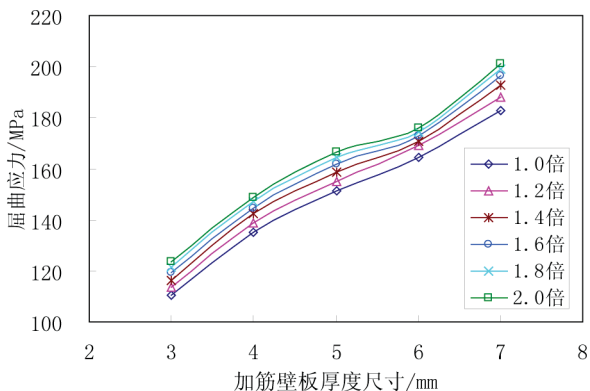


图 16 端部夹持加筋平板屈曲应力

通过图 16 和图 17 可看出,夹持结构厚度由加筋壁板厚度的 1.0 倍逐渐增加到 2.0 倍的过程中,壁板端部支持系数增加呈现放缓趋势。与图 11 进行对比,端部夹持对提高加筋壁板屈曲应力作用非常明显。

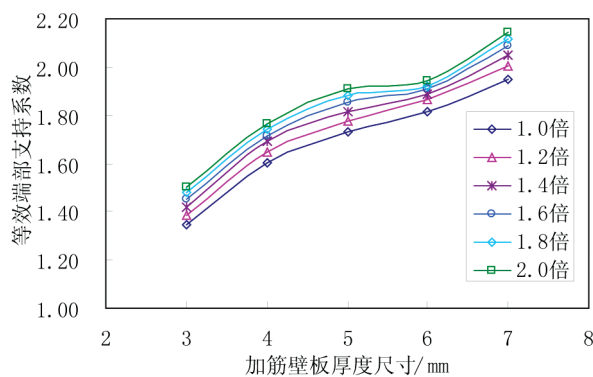


图 17 端部夹持加筋平板等效端部支持系数

### 5.4 加筋曲板压缩屈曲

飞机机翼壁板通常带有一定的曲率,曲率能够增大壁板整体的扭转及弯曲刚度。

分别对曲率半径  $R$  为 5 000 mm、7 000 mm、10 000 mm 和 15 000 mm 的含有 7 根长桁的加筋曲板进行屈曲分析。计算得到失稳临界应力如图 18 所示,等效端部支持系数如图 19 所示。

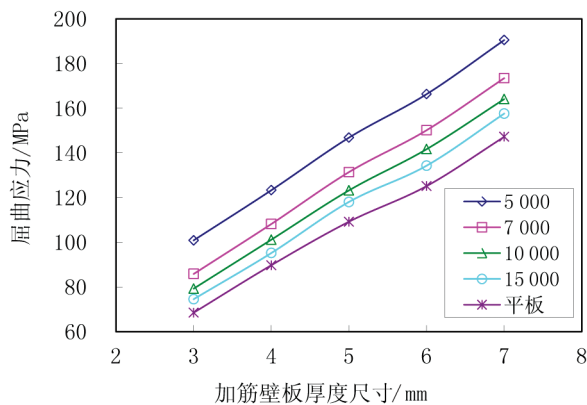


图 18 加筋曲板屈曲应力

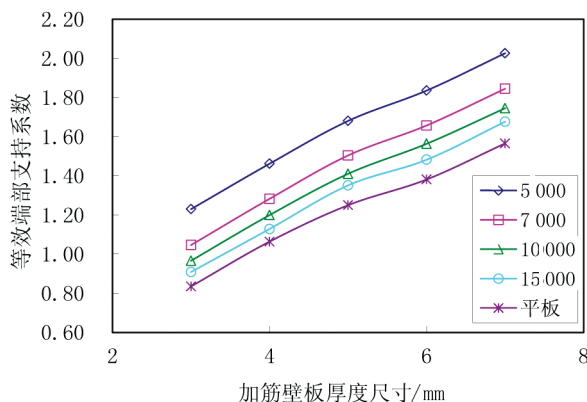


图 19 加筋曲板等效端部支持系数

从图 18 和图 19 可看出,加筋壁板等效端部支持系数随着曲率增加而增大。曲率半径为 15 000 mm 的加筋壁板,其等效端部支持系数比平加筋壁板高 10% 以上。曲率对加筋壁板的失稳临界应力影响较为显著。

### 5.5 端部夹持且侧边梁支持加筋曲板压缩屈曲

通过以上计算分析,端部夹持、两侧梁支持、曲率半径因素均对含有 7 根长桁的加筋壁板的压缩失稳临界应力产生影响。综合以上因素对加筋壁板进行屈曲应力计算分析。

根据参考文献[5]第 229-232 页,插入件与被插入件在挤压应力,拉伸应力和螺栓直径相同的情况下,插入件与被插入件载荷传递系数比值约为  $0.89/0.735 = 1.21$ 。因此,结构设计要求被插入件厚度为插入件的至少 1.2 倍。因此,对于端部夹持件厚度取加筋壁板厚度的 1.2 倍。

计算得到失稳临界应力如图 20 所示,等效端部支持系数如图 21 所示。

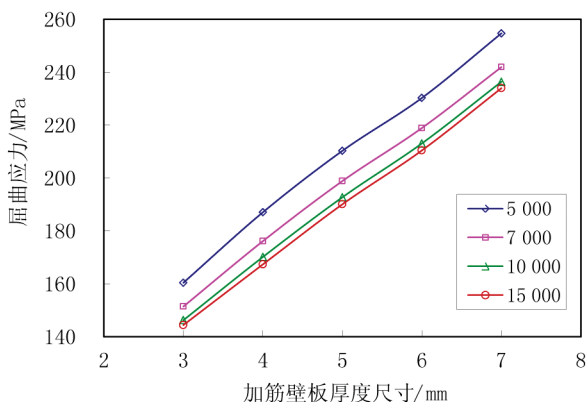


图 20 加筋壁板屈曲应力

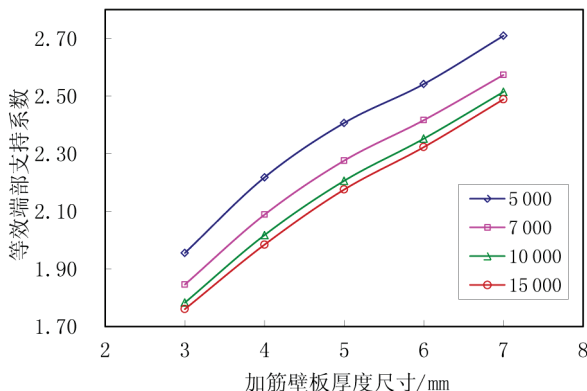


图 21 加筋壁板等效端部支持系数

各因素对加筋壁板的屈曲的综合影响较大,曲率半径为 15 000 mm 的加筋壁板等效端部支持系数 C 最小,为 1.76,但相比两端简支的加筋平板有很大的提高。

## 6 结论

分别对侧边支持、端部夹持、曲率三种因素单独进行分析,以及综合以上因素对加筋壁板稳定性的影响进行了分析研究,得到结论如下:

(1)端部夹持对加筋壁板压缩稳定性影响最大,端部夹持件厚度取壁板厚度的 1.2 ~ 1.4 倍较好;

(2)加筋壁板侧边展向梁弹性支持对加筋壁板压缩屈曲影响较大,为了提高加筋壁板压缩失稳临界应力,可适当增加展向梁数量;

(3)曲率半径对加筋壁板压缩屈曲影响明显,特别是当加筋壁板曲率半径较小时尤为明显;

(4)随着加筋壁板厚度的增加,加筋壁板端部支持系数可取 1.5 ~ 2.0。

### 参考文献:

- [1]《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 9 册:载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [2]崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
- [3]苟文选,金保森,卫丰. 材料力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001.
- [4]牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
- [5]郑晓玲,等. 民用飞机耐久性与损伤容限设计手册(上册)[M]. 北京:航空工业出版社,2003.

### 作者简介

龚德志 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计分析;Tel:20865865;E-mail:gongdezhi@comac.cc

王新栋 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计分析;Tel:20865923;E-mail:wangxindong@comac.cc

叶聪杰 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计分析;Tel:20865919;E-mail:yecongjie@comac.cc